

Исследование характеристик мощных белых светодиодов и светодиодных модулей на основе полупроводникового кристалла и люминофора

А. Л. Гофштейн-Гардт¹, Л. М. Коган¹, И. Т. Рассохин¹, Н. П. Социн², А. Н. Туркин^{3,*}, И. С. Матешев³
 ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ». Россия, 105187, Москва, Щербаковская улица, д. 53

ООО «НПК «Люминофор». Россия, 141190, г. Фрязино, Московская область, Заводской проезд, д. 2
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

физический факультет, кафедра оптики и спектроскопии.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 24.10.2013; Подписана в печать 04.12.2013)

Статья посвящена исследованию характеристик мощных светодиодов и светодиодных модулей белого цвета свечения. Актуальность данной работы обусловлена стремительным развитием технологии белых светодиодов, в результате чего данные приборы в настоящее время рассматриваются в качестве замены существующих источников света — разрядных ламп и ламп накаливания. В статье представлены спектральные зависимости различных образцов белых светодиодов и светодиодных модулей, приведены зависимости светового потока и световой отдачи от тока, дан краткий анализ полученных результатов.

PACS: 78.30.Fs

УДК:538.958

Ключевые слова: полупроводниковый светодиод, белый светодиод, световой поток, световая отдача, полупроводниковый кристалл, люминофор, люминесценция.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые светодиоды (СД) совсем недавно стали использоваться в качестве источников света, но их развитие и усовершенствование оказалось настолько стремительным, что уже сейчас становится актуальным вопрос о полном вытеснении ими традиционных источников света — разрядных ламп и ламп накаливания. На сегодняшний день световая отдача (η_v) СД превзошла световую отдачу лампы накаливания, люминесцентной и ртутной лампы. Можно сказать, что СД вышли на один уровень с самыми эффективными источниками света, используемыми в светотехнике, — натриевыми лампами высокого давления. В настоящее время светодиодные устройства, использующиеся, например, для наружного освещения — парковых площадок, скверов, дорожного освещения, освещения железнодорожных перронов и платформ — содержат сотни мощных СД со световым потоком 90-120 лм и световой отдачей 80-110 лм/Вт. Эти значения достигаются в светотехнических системах, разработанных на основе СД как ведущих зарубежных фирм, так и некоторых отечественных производителей. Для более эффективного решения этих и других задач, например прожекторных, освещения фасадов зданий и т. п., целесообразно применять более мощные белые СД и модули (СДМ) с высокими значениями светового потока и световой отдачи. При этом надо отметить, что индекс цветопередачи (R_a) светодиодов существенно выше, чем у натриевых ламп, что делает их свет более качественным и удобным для человека. Значения R_a для стандартных белых светодиодов находятся в диапазоне 60-80,

тогда как у натриевых ламп он равен примерно 20. Однако и такие значения могут быть недостаточными для ряда применений, где требуется точная передача цветов освещаемого объекта. В частности, это существенно для освещения картин в музеях [1]. Поэтому не менее важно при разработке светодиодов белого свечения повышать индекс цветопередачи R_a при сохранении высокой световой отдачи η_v [1]. Это позволит существенно расширить области применения светодиодов в качестве источников света для осветительных установок и светотехнических систем.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ СД И СДМ

Исследуемые в работе образцы СД и СДМ были разработаны с использованием кристаллов на основе гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN синего цвета свечения производства фирмы «SemiLEDs». Размер кристаллов составлял 1.52 мм × 1.52 мм. Согласно данным производителя мощность излучения кристаллов составляла 750-800 мВт при токе 700 мА, длина волны излучения $\lambda_{\text{дом}} = 450-460$ нм. СД изготавливались на печатной плате с Al основой (рис. 1).

СД типа У-133Бл-2 содержит 3 кристалла, СД типа У-131Бл — 4 кристалла, соединенных последовательно. Светообразующий узел СД содержит керамический отражатель, силикон с показателем преломления $n = 1.53-1.54$ и удаленный от кристалла люминофор (в соответствии с [2]). СДМ типа МСО-18Бл-1 также выполнен на печатной плате с Al основой (рис. 1). Были использованы 7 кристаллов, соединенных последовательно. Вокруг каждого кристалла выполнен светопреобразующий узел [2]. Габариты модуля составляли 30 мм × 30 мм × 5 мм. Для получения белого цвета использовался люминофор (ЛФ) на основе алюмо-

*E-mail: andrey@turkin.su

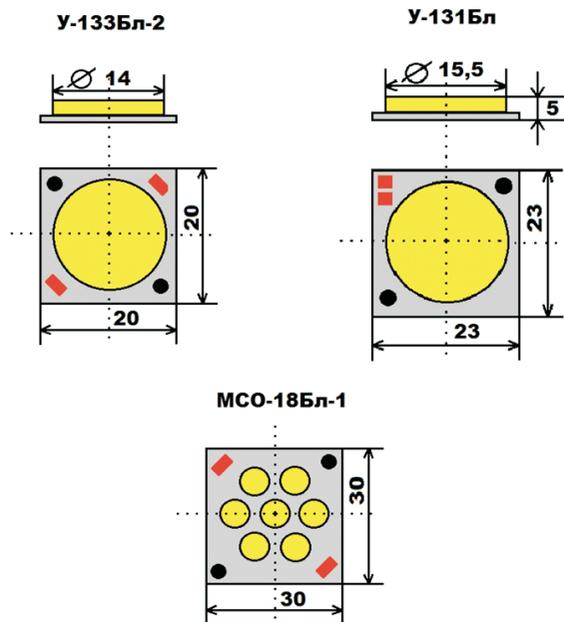


Рис. 1: Конструкции светодиодов и светодиодного модуля

итриевого граната. ЛФ имеет более широкий спектр возбуждения, что также способствует росту эффективности СД и СДМ примерно на 5-7%. Размер зерен ЛФ составляет примерно 8-12 мкм. Стоит отметить, что для увеличения термостойкости ЛФ была повышена химическая чистота используемых продуктов, а также уменьшено содержание гадолиния на 5-7 мольных процентов. Для сохранения спектрального максимума излучения в диапазоне 550-565 нм дополнительно введены ионы фтора и азота. Одной из важных задач при разработке исследуемых модулей являлся поиск и подбор максимального спектрального соответствия излучения кристалла и спектра возбуждения люминофора [3].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения основных параметров исследованных СД и СДМ приведены в таблице 1. Коррелированная цветовая температура указанных СД и СДМ лежит в диапазоне 4000-5000 К, что соответствует естественному белому свету. На рис. 2а представлена зависимость светового потока (Φ_{ν}) от тока — люмен-амперная характеристика (ЛАХ) — СД У-133Бл-2. На рис. 2б приведена зависимость световой отдачи η_{ν} данного образца от тока.

Как следует из указанных рисунков и таблицы 1, СД У-133Бл-2 позволяет получить световой поток до 700 лм при прямом токе 700 мА и световую отдачу 108 лм/Вт. Прямое напряжение составляет не более 9.5 В, а потребляемая электрическая мощность не пре-

восходит 6.5 Вт. Сила света составляет 190-200 кд при значении угла излучения $2\theta_{0.5} = 120^\circ$ [4].

На рис. 3а представлена ЛАХ СД У-133Бл, а на рис. 3б — зависимость световой отдачи данного образца от тока.

Из указанных рисунков и таблицы 1 видно, что СД У-131Бл позволяет получить световой поток до 900 лм при токе 700 мА и световую отдачу 105 лм/Вт. Прямое напряжение составляет не более 12.5 В, а потребляемая электрическая мощность не превосходит 8.5 Вт. Сила света равна приблизительно 240-260 кд при значении угла излучения $2\theta_{0.5} = 120^\circ$ [4].

ЛАХ и зависимость световой отдачи от тока образца СДМ МСО-18Бл-1 представлены на рис. 4а и рис. 4б, соответственно.

Как видно из рисунков и таблицы 1, СДМ МСО-18Бл-1 позволяет получить световой поток 1500 лм при токе 700 мА и световую отдачу 104 лм/Вт. Прямое напряжение составляет не более 21.5 В, а потребляемая электрическая мощность равна 15 Вт. Сила света составляет 400 кд при значении угла излучения $2\theta_{0.5} = 120^\circ$. Следует отметить низкие прямые напряжения, получаемые при использовании кристаллов размером 1.52 мм × 1.52 мм, что способствует снижению потребляемой мощности и, как следствие, увеличению световой отдачи.

Типичные спектры излучения исследованных СД и СДМ, представленные на рис. 5 при нескольких значениях тока, имеют максимум полосы излучения ЛФ в диапазоне 555-575 нм и полуширину спектральной линии ЛФ примерно 135-145 нм. Одной из важных задач при разработке исследуемых модулей являлся поиск и подбор максимального спектрального соответствия излучения кристалла и спектра возбуждения люминофора (ЛФ) [3]. Используемый ЛФ был создан на основе модифицированных алюминатных соединений со структурой граната [3, 5]. Размер его зерен, как было отмечено выше, составляет примерно 8-12 мкм, для увеличения его термостойкости была повышена химическая чистота используемых продуктов и уменьшено содержание гадолиния на 5-7 мольных процентов, а для сохранения спектрального максимума излучения в диапазоне 550-565 нм были дополнительно введены ионы фтора и азота. Из приведенных спектральных зависимостей видно, что ЛФ в исследуемых СД и СДМ имеет достаточно широкий спектр возбуждения. Как было отмечено выше, этот факт, наряду с улучшенными характеристиками используемых кристаллов и особенностями конструкции светодиода [2], способствует росту эффективности СД и СДМ примерно на 5-7%. Максимумы спектральной линии полупроводниковых кристаллов на основе GaN-гетероструктур лежат в диапазоне 450-460 нм (рис. 5). Полуширина спектральной линии электролюминесценции кристаллов составляет 20-30 нм (рис. 5). В результате получают следующие значения координат цветности исследуемых образцов: $x = 0.37$, $y = 0.41-0.42$. Индекс цветопередачи $R_a = 70-75$, что соответствует

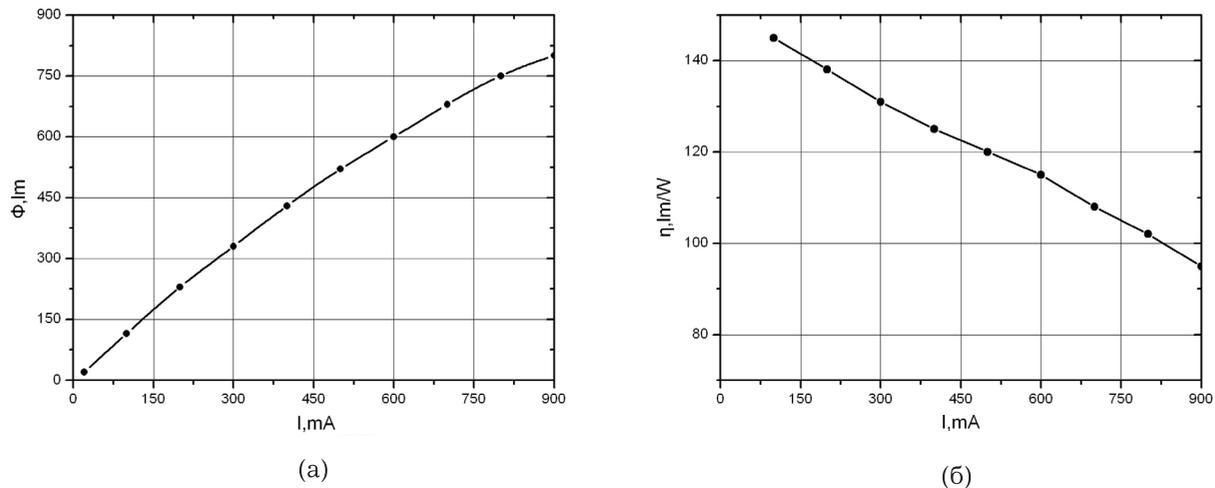


Рис. 2: Характеристики СД У-133Бл-2: (а) — зависимость светового потока (Φ_v) от тока; (б) — зависимость световой отдачи (η_v) от тока

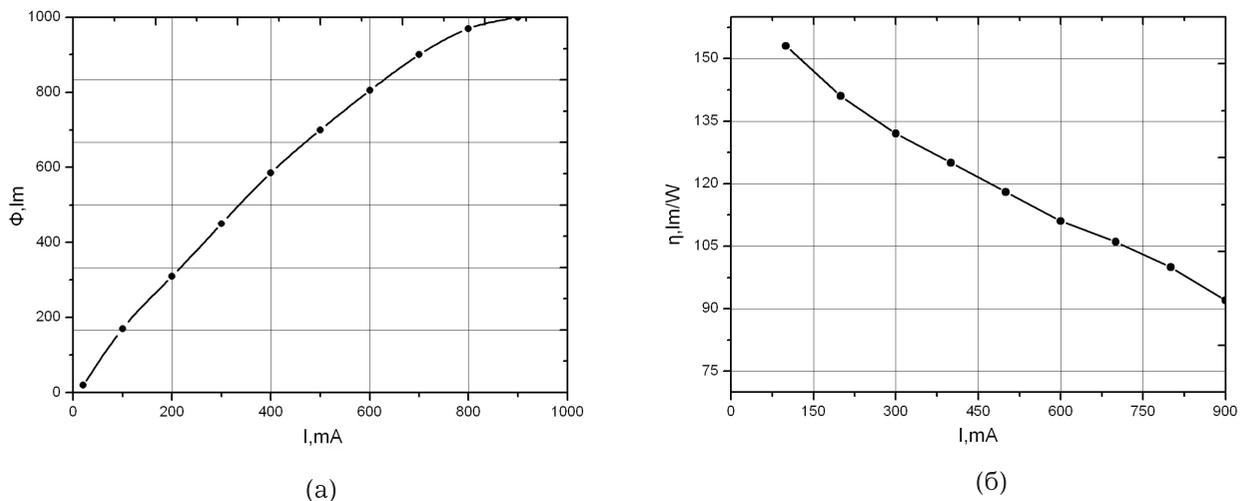


Рис. 3: Характеристики СД У-133Бл: (а) — зависимость светового потока (Φ_v) от тока; (б) — зависимость световой отдачи (η_v) от тока

значениям R_a стандартных белых светодиодов, и эти значения достаточны для общего освещения. СД типа У-133Бл-2 по световому потоку примерно соответствует лампе накаливания (ЛН) мощностью 60 Вт, при этом его потребляемая электрическая мощность составляет всего 6.5 Вт. СД типа У-131Бл по световому потоку соответствует ЛН мощностью 75 Вт, при этом его потребляемая электрическая мощность составляет 8.5 Вт. СДМ типа МСО-18Бл-1 при малых габаритах по световому потоку превышает ЛН с мощностью 100 Вт, а его потребляемая электрическая мощность при этом составляет 15 Вт. Использование представленных СД и СДМ совместно с различными типами вторичной оптики — рефлекторами и линзами — со-

здает возможности для получения у разрабатываемых источников света высоких значений силы света и, как следствие, высокой освещенности.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны СД и СДМ с использованием кристаллов на основе Ga-N-гетероструктур синего цвета свечения ($\lambda_{\text{дом}} = 450\text{--}460$ нм) с высокими значениями оптической мощности излучения.
2. В модулях применен (ЛФ) на основе алюмоиттриевого граната с увеличенной шириной спек-

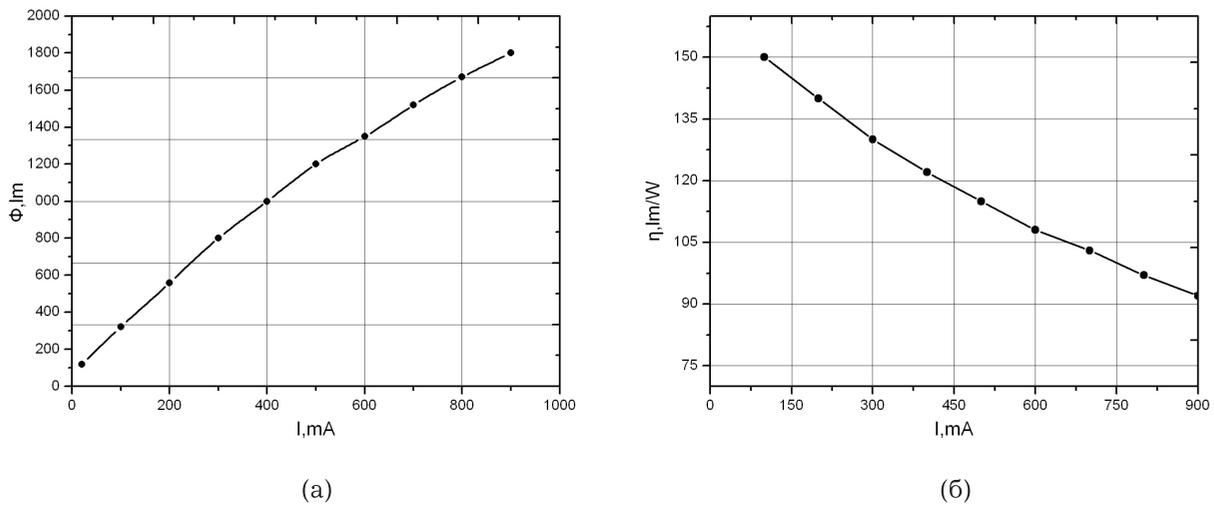


Рис. 4: Характеристики СДМ МСО-18Бл-1: (а) — зависимость светового потока (Φ_ν) от тока; (б) — зависимость световой отдачи (η_ν) от тока

Таблица I:

Тип СД и СДМ	Входные электрические параметры			Световой поток, Φ_ν , лм			Сила света, J_ν , кд, тип.	Световая отдача, η_ν , лм/Вт
	ток, мА	$U_{пр}$, В, тах	$P_{эл}$, Вт	мин.	тип.	макс.		
У-133Бл-2	700	9.5	6.5	600	670	700	195.0	108
У-131Бл	700	12.5	8.5	800	850	900	210.0	105
МСО-18Бл-1	700	21.5	15.0	1450	1500	1550	400.0	104

Примечания: Угол излучения $2\theta_{0.5} = 120^\circ$.

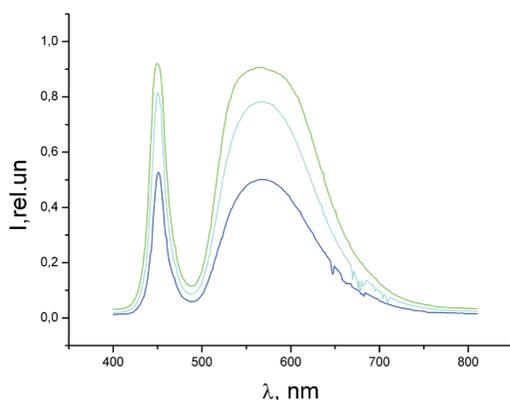


Рис. 5: Типичные спектры излучения исследованных СД и СДМ при нескольких значениях тока

тра возбуждения и повышенной термостойкостью, в результате чего удалось увеличить эффективность СД и СДМ примерно на 5-7%.

3. Световая отдача исследуемых СД и СДМ при токе 700 мА составляет 104-108 лм/Вт, индекс цветопередачи исследованных образцов при рабочем токе равен примерно $R_a = 70-75$, что является достаточным для планируемых применений.
4. Разработанные СД и СДМ с увеличенным световым потоком при высокой световой отдачей перспективны для использования в светодиодных осветительных приборах.

[1] Гальчина Н. А., Гутцайт Э. М., Дворников Е. А., Коган Л. М., Рассохин И. Т., Социн Н. П., Туркин А. Н., Юно-

вич А. Э. Светотехника. № 1. С. 32. (2013).

- [2] Гальчина Н. А., Коган Л. М. Патент РФ № 2416841. Конструкция светодиода с люминофором.
- [3] Гальчина Н. А., Коган Л. М., Социн Н. П., Туркин А. Н. Тезисы докладов 9-ой Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия, структуры и приборы». С. 28. (2013).
- [4] Гофштейн-Гардт А. Л., Коган Л. М., Рассохин И. Т., Социн Н. П. Тезисы докладов 9-ой Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия, структуры и приборы». С. 170. (2013).
- [5] Гальчина Н. А., Гофштейн-Гардт А. Л., Коган Л. М., Социн Н. П. Светотехника. № 4. С. 51. (2010).

Power white light emitting diodes and module based on semiconductor chip and phosphor characteristics investigation

A. L. Gofshtein-Gardt¹, L. M. Kogan¹, I. T. Rassokhin¹, N. P. Soschin², A. N. Turkin^{3a}, I. S. Mateshev³

¹«SPC OEE «OPTEL» Ltd. 53 Shcherbakovskaya str., Moscow, 105187, Russia

²«SPC «Luminofor» Ltd. 2 Zavodskoy pr., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia

³M. V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, Optics and Spectroscopy Department. 1-2 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: ^aaandrey@turkin.su

The article deals with power white light emitting diodes and modules characteristics investigation. This work actuality is caused by sweeping development of white light emitting diodes technology with a result that these devices are actually being concerned as a substitution of currently used light source - discharge lamps and incandescent bulbs. Different white light emitting diode and module samples spectral dependencies are presented in the article, luminous flux and light efficiency curves versus current are given, short results analysis is described.

PACS: 78.30.Fs

Keywords: semiconductor light emitting diode, white light emitting diode, luminous flux, light efficiency, semiconductor chip, phosphor, luminescence.

Received 24.10.2013

Сведения об авторах

1. Гофштейн-Гардт Алексей Леонидович — главный технолог ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»; тел.: +7-495-366-05-33.
2. Коган Лев Моисеевич — доктор технических наук, действительный член Международной Академии Информатизации, Директор по новой технике ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»; тел.: +7-495-366-05-33.
3. Рассохин Игорь Тимофеевич — кандидат технических наук, Генеральный директор ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»; тел.: +7-495-366-05-33.
4. Социн Наум Петрович — кандидат химических наук, начальник лаборатории ООО «НПК «Люминофор»; тел.: +7-495-465-88-88.
5. Туркин Андрей Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова; тел.: +7-495-939-29-94, e-mail: andrey@turkin.su.
6. Матешев Игорь Сергеевич — физик, выпускник физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова 2014 года; e-mail: mateshevis@gmail.com.